

## МОДЕЛЮВАННЯ ВРОЖАЙНОСТІ ОЗИМОЇ ПШЕНИЦІ В СТЕПОВІЙ ЗОНІ УКРАЇНИ З ВИКОРИСТАННЯМ ВЕГЕТАЦІЙНИХ ІНДЕКСІВ

*Розглянуто особливості використання супутникових вегетаційних індексів - нормалізованого вегетаційного індексу NDVI та нормалізованого водного індексу NDWI в емпіричному моделюванні врожайності зернових культур. Для областей степової зони України побудовано лінійні регресійні моделі врожайності озимої пшениці, предикторами в якій є параметри, утворені від базових вегетаційних індексів - індекс умов вегетації та запропонований індекс вологості рослинності. Також в моделі був використаний регіональний індекс блокування атмосфери для врахування циркуляційних умов на початку вегетації. Верифікація моделей показала задовільну точність прогнозування врожайності з достатньо високою завчасністю.*

**Ключові слова:** нормалізований вегетаційний індекс, індекс блокування, врожайність.

**Вступ.** Україна є одним з провідних виробників та експортерів зернових культур, зокрема, пшениці. Озима пшениця, при цьому, складає понад 90% від всього валового обсягу цієї культури. Завдяки підвищенню агротехнології виробництва середня по Україні врожайність пшениці зросла від 19,8 ц/га в 2000 році до 28 ц/га в 2012 році, а в 2013 році був зібраний загальний рекордний врожай зернових – 63 млн. т. Завчасне прогнозування врожайності є важливим аспектом економічної діяльності країни, що підвищує актуальність розробок нових та удосконалення існуючих методів прогнозу.

В останні десятиліття в агрометеорологічних дослідженнях активно використовуються дані супутникового зондування атмосфери та підстильної поверхні, зокрема, для вирішення задач моніторингу стану сільськогосподарських культур та динаміки їх розвитку в змінних погодних умовах [1]. Отримані на базі спектральних залежностей між відбивною здатністю електромагнітного випромінювання і станом рослинності так звані вегетаційні індекси є доволі численними та можуть застосовуватися для різних цілей [2]. Найбільшою популярністю користується нормалізований диференційний вегетаційний індекс (normalized difference vegetation index, NDVI) та похідний від нього індекс умов вегетації (vegetation condition index, VCI), запропонований в [3]. На базі цих параметрів останнім часом різними авторами, в тому числі й в Україні, розроблена ціла низка емпіричних моделей регресійного зв'язку між врожайністю певної культури та вегетаційними індексами [4-9]. Ці моделі мають певні переваги перед існуючими статистичними методами прогнозу врожайності, але потребують подальшого вдосконалення.

В даному дослідженні запропонована регресійна модель врожайності озимої пшениці для степової зони України, в якій предикторами є регіональний індекс блокування атмосфери ECBI [10], що враховує циркуляційні особливості атмосфери в вегетаційний період, індекс умов вегетації VCI та введений новий індекс вологості рослинності WVI.

**Матеріали та методи дослідження.** В якості вихідної інформації використані дані 8-ми та 16-денних композитів вегетаційних індексів MODIS/NDVI та MODIS/NDWI з просторовим розділенням 250 метрів, осереднених по кожній області, з бази даних проекту GLAM (the Global Agriculture Monitoring Project, <http://deleon.edc.usda.gov/glam.htm>). Інформація спектрорадіометра MODIS надходить до цієї бази з супутників Terra та Aqua (NASA).

Вихідна вибірка по вегетаційних індексах складена за період 2000-2013 рр. для 9 областей України, що відносяться до степової зони.

Як вже зазначалося, спектральний вегетаційний індекс  $NDVI$  використовується в якості предиктора регресійних моделей як в чистому вигляді [8], так і в перетвореному на індекс умов вегетації (vegetation condition index,  $VCI$ )

$$VCI = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \cdot 100\% , \quad (1)$$

де  $NDVI$  – поточне 8 денне (декадне, тижневе тощо) значення нормалізованого вегетаційного індексу;

$NDVI_{max}$ ,  $NDVI_{min}$  – абсолютний міжрічний максимум та мінімум нормалізованого вегетаційного індексу за той же період.

Переваги цього індексу перш за все в тому, що він відображує не просто стан рослинності чи підстильного покриву, як  $NDVI$ , а саме такий стан, що склався завдяки поточним метеорологічним умовам. Значення  $VCI > 80\%$  відповідають сприятливим умовам вегетації, а при  $VCI < 35\%$  констатують посуху різної інтенсивності [3]. Тому індекс  $VCI$  з успіхом використовується для моніторингу посух на різних територіях земної кулі [6, 11-12].

Для оцінки вмісту вологи в рослинному покриві застосовують декілька індексів, отриманих у вузьких спектральних зонах видимого та ближнього інфрачервоного діапазону [2], найвідомішим з яких є нормалізований диференційний водний індекс (normalized difference water index,  $NDWI$ ), запропонований Гао Б. [13]. Для розрахунку цього індексу використовують два вузьких канали, зосереджені на довжинах хвиль близько 0,86 та 1,24 мкм. Обидва канали є чутливими до вмісту рідини в рослинному покриві, а сам індекс є мірою кількості молекул рідкої води, які взаємодіють з сонячною радіацією, що надходить до рослинності. Розрахункова формула для  $NDWI$  має вигляд

$$NDWI = \frac{R_{0,86} - R_{1,24}}{R_{0,86} + R_{1,24}} , \quad (2)$$

де  $R_{\lambda}$  - інтенсивність відбитого сигналу на відповідній довжині хвилі  $\lambda = 0,86$  або  $1,24$  мкм.

$NDWI$  є менш чутливим, на відміну від  $NDVI$ , до впливу атмосферного розсіювання за рахунок аерозолів. Порівняно з  $NDVI$ , нормалізований водний індекс не повністю вільний від фонового впливу підстильної поверхні в районах, частково вкритих рослинністю. При цьому внесок оголеного ґрунту в  $NDWI$  переважно негативний, тоді як зелена рослинність дає позитивний вплив [13]. Використання індексу  $NDWI$  для оцінки стану рослинного покриву передбачає той факт, що здорова рослинність в певні етапи розвитку має високий вміст рідкої води, який відбивається у високих значеннях індексу. Посушливі умови призводять до зниження вологовмісту рослинності, що відбивається у зниженні значень  $NDWI$  та може використовуватись також для оцінки пожежонебезпечності, наприклад, в лісових масивах.

Індекс  $NDWI$  також застосовується в фенології, адже він добре реагує як на стан рослинності, так й підстильної поверхні. Так, в роботі [14] для районів Сибіру були визначені особливості зміни індексу в важливих фенологічних фазах - початок вегетації, початок пожовтіння листа та під час сніготанення. Показано, що протягом весни мінімум  $NDWI$  відповідає стану рослинності перед початком її зростання. Період зниження значень  $NDWI$  весною до мінімуму відповідає процесу сніготанення, а наступний за ним період збільшення індексу характеризує початок росту рослинності. Такий злам в часовому ході  $NDWI$  навесні допомагає відокремити дати закінчення сніготанення та початку вегетації. Восени дата початку пожовтіння листа настає з моменту, коли  $NDWI$  починає зменшуватися. Потім настає період, коли  $NDWI$  знову починає зростати, що відповідає процесу накопичення снігу.

Такі властивості нормалізованого водного індексу можуть використовуватись й для моделювання врожайності зернових культур, адже дата початку вегетації важлива для озимих, а вологовміст рослинності на стадіях розвитку відповідає умовам росту та поточному стану рослини.

Розглянемо особливості часового ходу *NDWI* на території України в період з лютого по листопад 2000-2013 рр. З рис. 1 можна бачити, що навесні дати мінімальних значень *NDWI* коливаються в більшості випадків в межах 22-29 березня або 6-13 березня, тобто вегетаційний ріст починався після цих тижнів у 80% розглянутих років. Найраніше загальний по Україні вегетаційний сезон почався в 2007 р. – 18-25 лютого, найпізніше у 2003 р. – 7-14 квітня.

Різниця річного ходу *NDWI* між областями України, що належать до зон стійкого та нестійкого снігового покриву, добре помітна з прикладів на рис. 2. Можна бачити, що в Одеській області, починаючи з середини жовтня, значення *NDWI* майже не змінюються і лише протягом лютого незначно збільшуються, коли наприкінці зими утворюється сніговий покрив. В Сумській області осінній спад *NDWI* завершується на початку листопада, потім значення поступово зростають, що відповідає накопиченню снігового покриву, досягаючи максимуму у лютому. Завдяки цьому мінімум *NDWI* навесні є дуже чітким і настає наприкінці березня – початку квітня.

Максимальні значення *NDWI* в Україні настають переважно в середині та наприкінці червня, при цьому в половині досліджених років максимум припав на тиждень 10-17 червня. Найранніші дати максимуму спостерігалися 25 травня-1 червня в 2000 та 2008 рр., а найпізніша дата – 12-19 липня 2003 року, коли відмічалася тривала весняна посуха [11]. Якщо порівнювати максимуми *NDWI* в різних агрокліматичних зонах, то можна бачити (див. рис. 2), що в Степу (Одеська область) середня максимальна водність рослинності значно менша, ніж в Лісостепу (Сумська область), що відповідає характеру рослинності, яка переважає.

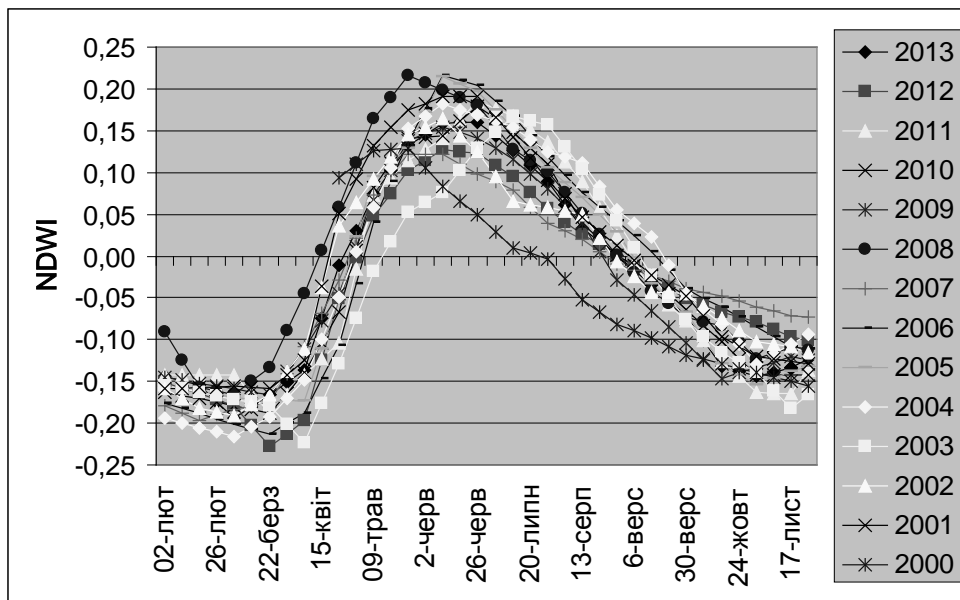


Рис. 1 – Річний хід *NDWI*, осередненого по території України, в період 2000-2013 рр.

Для одноманітності інтерпретації вегетаційних індексів, що використовуються в подальшому дослідженні, введемо новий індекс на базі *NDWI* – індекс вологості рослинності *WVI* (Wet Vegetation Index), який визначається математичним виразом

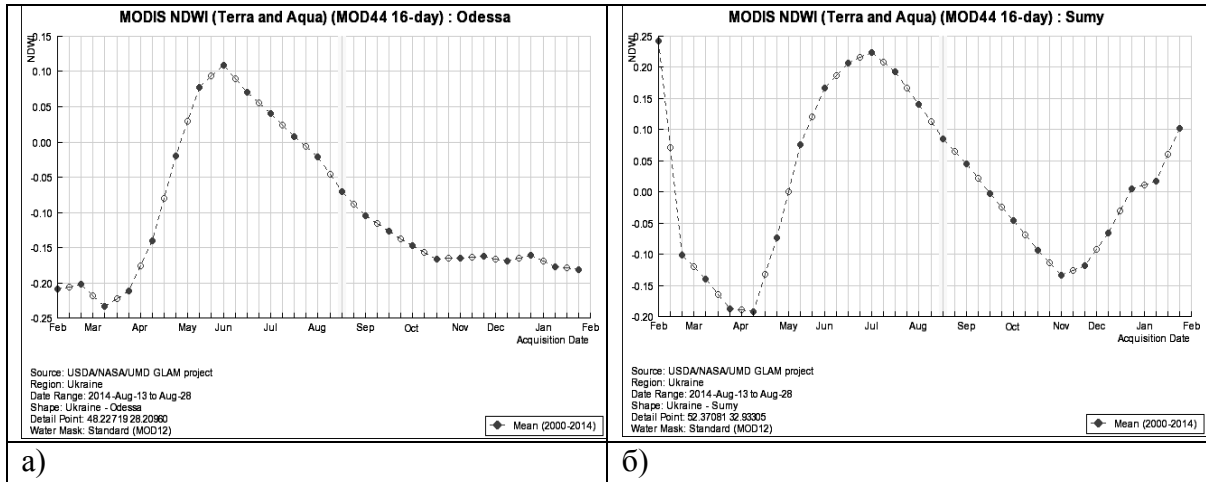


Рис. 2. – Осереднені криві річного ходу  $NDWI$  по Одеській (а) та Сумській (б) областях

$$WVI = \frac{NDWI - NDWI_{\min}}{NDWI_{\max} - NDWI_{\min}} \cdot 100\% , \quad (3)$$

де  $NDWI$  – поточне (тижневє, декадне тощо) значення нормалізованого водного індексу;

$NDWI_{\max}$ ,  $NDWI_{\min}$  – абсолютний міжрічний максимум та мінімум нормалізованого водного індексу за той же період.

Як можна передбачити, чим більша різниця між поточним значенням  $NDWI$  та його абсолютним мінімумом в певний період, тим більш насичений молекулами води рослинний покрив, який зондується. Тому, як й для індексу  $VCI$ , можна відзначити, що високі значення  $WVI$  (понад 80%) відповідають доброму стану рослин з високим вмістом вологи, а значення  $WVI$  менші за 50% свідчать про сухість та втрату тургору рослин.

Лінійні регресійні моделі для моделювання врожайності озимої пшениці будемо будувати для середньообласних значень абсолютної врожайності  $Y_{a\delta}$  (ц/га) та відносної врожайності  $Y_{\delta\delta}$ , яка визначається за формулою

$$Y_{\delta\delta} = \frac{Y_{a\delta}}{Y_{mp}} , \quad (4)$$

де  $Y_{mp}$  – врожайність зернової культури за трендом на поточний рік, яка визначалася за методом гармонійних ваг [15].

Загальне лінійне рівняння регресії для розв'язання поставленої задачі має вигляд

$$Y = a + bECBI + cVCI + dWVI . \quad (5)$$

В рівнянні (5) в якості предиктанта  $Y$  виступають значення середньообласної врожайності  $Y_{a\delta}$  або  $Y_{\delta\delta}$ . Місячні значення регіонального індексу блокування  $ECBI$  розраховувалися за методикою, запропонованою в [10]. Європейський континентальний індекс блокування відображує стан зонального потоку на рівні 300 гПа по відношенню до кліматичної норми. При  $ECBI > 0$  фіксується блокування зонального потоку, при  $ECBI < 0$  - зональний потік інтенсивніший за норму.

Обрання дат (періодів), в які для кожної області береться значення предикторів  $VCI$ ,  $WVI$  та  $ECBI$ , було здійснено шляхом оцінки тісноти кореляційного зв'язку між врожайністю та відповідним параметром в весняно-літній період, тобто предиктори бралися в ті тижні, коли коефіцієнт кореляції був максимальним. Дані щодо

врожайності озимої пшениці по областях степової зони за 2000-2013 рр. отримані з статистичних бюлетеней Держкомстату України.

**Результати та їх аналіз.** В табл. 1 наведені результати моделювання врожайності озимої пшениці для 8 південних областей та АР Крим з урахуванням циркуляційних особливостей атмосфери. Як можна бачити, найбільший вплив блокування атмосфери на формування врожаю має місце в березні або лютому, і лише в Луганській області найбільша кореляційна залежність припадає на травень. Для більшості областей максимальний коефіцієнт кореляції врожайності з місячними значеннями *ЕСВІ* коливається в межах -0,40...-0,60, а зворотний зв'язок вказує на переважання посиленої зональної циркуляції в лютому-березні ( $ЕСВІ < 0$ ), яка, очевидно, сприяє формуванню підвищеної кількості опадів і зволоженню ґрунту напередодні вегетаційного сезону. Індекс умов вегетації *VCI* для більшості областей має найкращу кореляцію з врожайністю в період з 15 по 23 травня, і лише в Кіровоградській та Луганській областях в період 9-16 червня. Для індексу вологості рослинності *WVI* період найкращого кореляційного зв'язку починається з 16 травня і до 8 червня по різних областях. Таким чином, за наявності вихідних даних по Одеській, Херсонській, Миколаївській областях та АР Крим прогноз врожайності може складатись одразу після 23 травня. В Донецькій області прогнозування можливе після 31 травня, в Запорізькій та Дніпропетровській областях – після 8 червня, а в Кіровоградській та Луганській областях – після 16 червня. Тобто, завчасність прогнозування становить 1-1,5 місяця до початку збору врожаю.

Статистичні оцінки моделювання для абсолютної та відносної врожайності показують, що для всіх областей коефіцієнти як множинної кореляції, так й детермінації є високими, а побудовані регресії за F-критерієм Фішера (для 5% рівня значущості) є статистично значущими, окрім Луганської області. Стандартна похибка моделювання становить в середньому 4,31 ц/га (без Луганської області). Використання трендової компоненти в предиктанті  $U_{\phi}$  дещо поліпшує статистичні оцінки регресії для Херсонської, Миколаївської, Кіровоградської, Луганської областей та АР Крим, але для інших областей переваги перед  $U_{\phi}$  немає.

За відсутності незалежної вибірки даних для оцінки якості прогнозування врожайності озимої пшениці за даною методикою скористуємося прийомом виключення окремих років при побудові регресій та подальшому прогнозуванні для них. По восьми областях (окрім Луганської), по чергово з регресії були виключені роки з 2007 по 2013. Цей період характеризувався як посушливими роками (2007, 2012 рр.), так й сприятливими для формування високого врожаю (2008, 2013 рр.). Прогнозовані по областях значення врожайності озимої пшениці за незалежними даними в моделях абсолютної та відносної врожайності оцінювалися за такими критеріями:

- середня абсолютна похибка  $\Delta \bar{Y}$ , яка дорівнює

$$\Delta \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|Y_{\phi} - Y_{np}|_i), \quad (6)$$

де  $Y_{\phi}$  – фактичне значення врожайності;  $Y_{np}$  – прогнозоване значення врожайності;  $n$  – кількість випадків прогнозу;

- стандартне відхилення  $\delta$ ;
- точність прогнозу  $T_{np}$  (визначається як різниця 100% та середньої абсолютної похибки у відсотках);

Таблиця 1 – Параметри регресії та статистичні оцінки моделювання абсолютної  $U_{аб}$  та відносної  $U_{вд}$  врожайності озимої пшениці

Область	Місяць для $ЕСВІ$	Дата для $VCI$	Дата для $WVI$	Коефіцієнти регресії*				Коефіцієнти*		Стандарт-на похибка*	Значущість* F
				$a$	$b$	$c$	$d$	множинної кореляції	детермінації		
Одеська	березень	16-23/05	16-23/05	12,97	-4,58	0,09	0,14	0,85	0,72	4,83	0,0038
				0,503	-0,157	0,005	0,004	0,83	0,69	0,20	0,0069
Херсонська	лютий	16-23/05	16-23/05	11,50	-2,28	0,11	0,13	0,90	0,82	3,62	0,0005
				0,487	-0,151	0,004	0,006	0,94	0,87	0,12	0,0001
Миколаївська	березень	16-23/05	16-23/05	11,48	-1,12	0,11	0,14	0,86	0,74	4,82	0,0026
				0,400	0,080	0,005	0,006	0,90	0,80	0,17	0,0007
Запорізька	березень	8-15/05	1-8/06	7,88	2,15	0,11	0,19	0,93	0,86	3,07	0,0001
				0,316	0,058	0,004	0,007	0,93	0,86	0,12	0,0001
Кіровоградська	березень	9-16/06	1-8/06	17,30	-8,13	0,06	0,15	0,82	0,68	6,40	0,0084
				0,509	-0,142	0,003	0,005	0,85	0,73	0,19	0,0034
Дніпропетровська	березень	8-15/05	1-8/06	8,54	-2,56	0,13	0,20	0,93	0,86	4,34	0,0001
				0,328	-0,124	0,005	0,006	0,92	0,84	0,16	0,0002
АР Крим	лютий	16-23/05	16-23/05	13,96	0,53	-0,06	0,20	0,89	0,79	2,60	0,0009
				0,660	-0,027	-0,003	0,009	0,93	0,86	0,08	0,0001
Донецька	березень	16-23/05	24-31/05	12,80	-2,41	-0,04	0,29	0,85	0,71	4,77	0,0044
				0,447	-0,062	-0,0004	0,009	0,82	0,68	0,18	0,0081
Луганська	травень	9-16/06	24-31/05	14,76	16,86	0,09	0,09	0,68	0,46	6,08	0,0920
				0,612	0,586	0,005	0,003	0,71	0,50	0,25	0,0652

\* - по кожній області статистичні оцінки регресії надані в послідовності зверху вниз для  $U_{аб}$  та  $U_{вд}$ .

- відносна ефективність, яка показує, наскільки використання моделей з супутниковими вегетаційними індексами ефективніше за прогнозування врожайності за трендом [9]:

$$E_{\text{вд}} = \frac{\sum_{i=1}^n ((Y_{\phi} - Y_{\text{тр}})_i)^2}{\sum_{i=1}^n ((Y_{\text{тр}} - Y_{\phi})_i)^2} \quad (7)$$

Всі перелічені оцінки прогнозування за моделями зведені до табл. 2. Як можна бачити, середня абсолютна похибка прогнозу коливається в межах 2,34-5,88 ц/га для моделі абсолютної врожайності та 2,30-4,76 ц/га для моделі з врахуванням тренда. При цьому найкращі показники фіксуються для Херсонської області та АР Крим, найгірші – для Кіровоградської та Донецької областей. Стандартне відхилення для обох моделей незначно перевищує 5 ц/га. Точність прогнозування по обох моделях в середньому становить 85-86%, при цьому перевищує 90% в Херсонській області та АР Крим. За оцінками відносної ефективності, запропоновані моделі значно поліпшують якість прогнозу порівняно з трендом майже в усіх областях, окрім Одеської та Донецької.

Таблиця 2 – Оцінки прогнозування за моделями абсолютної  $Y_{\text{аб}}$  та відносної  $Y_{\text{вд}}$  врожайності озимої пшениці по областях степової зони України

Область	Модель $Y_{\text{аб}}$				Модель $Y_{\text{вд}}$			
	$\Delta\bar{Y}$	$\delta$	$T_{\text{тр}}$	$E_{\text{вд}}$	$\Delta\bar{Y}$	$\delta$	$T_{\text{тр}}$	$E_{\text{вд}}$
Одеська	4,74	6,49	83,66	0,69	4,02	6,01	85,37	0,72
Херсонська	2,34	3,44	91,16	3,30	2,42	3,27	90,99	4,41
Миколаївська	4,98	6,24	82,21	0,84	4,76	6,24	82,53	1,00
Запорізька	3,11	3,65	86,81	2,15	2,94	3,42	87,82	2,39
Кіровоградська	5,88	5,76	80,67	0,79	4,63	5,41	84,31	1,10
Дніпропетровська	3,36	4,24	88,93	2,77	3,93	4,85	86,60	2,13
АР Крим	2,50	5,33	90,21	2,74	2,30	5,70	90,69	4,41
Донецька	5,06	6,67	82,29	0,58	4,57	6,78	83,86	0,62
<b>Середнє</b>	<b>4,00</b>	<b>5,23</b>	<b>85,74</b>	<b>1,73</b>	<b>3,70</b>	<b>5,21</b>	<b>86,52</b>	<b>2,10</b>

Загалом, модель відносної врожайності озимої пшениці дає більш точні результати, тобто врахування технологічної складової формування врожайності у вигляді тренда та метеорологічного фактора у вигляді вегетаційних індексів та індексу блокування є більш оптимальним для вирішення задачі прогнозування врожайності. Найбільші похибки прогнозу траплялися у роки з відносно високою врожайністю (наприклад, 2008-2009 рр. та особливо 2013 р.), коли показники вегетаційних індексів були також високі, але вони виявляються не настільки чутливими, щоб відобразити амплітуду коливань врожайності. В такі роки модель з врахуванням тренда була більш ефективною для більшості розглянутих областей.

**Висновки.** Аналіз моделювання врожайності озимої пшениці для областей в степовій зоні України з використанням супутникових вегетаційних індексів та індексу блокування атмосфери показав високу прогностичну ефективність побудованих регресійних моделей, що робить їх перспективними для подальшого вдосконалення при збільшенні часових рядів вихідних даних та розповсюдження на інші області України. Залучення до моделювання введеного індексу вологості рослинності  $WVI$ , побудованого на базі  $NDWI$ , а також регіонального індексу блокування  $ESBI$ , дозволило обґрунтувати фізичні фактори, які досі не включалися до подібних моделей, а саме: характер циркуляційних процесів атмосфери в період вегетації та вологонасиченість рослинності. До недоліків моделювання саме озимої культури

можна віднести неврахування умов зимівлі, що дає ще один напрямок дослідження взаємозв'язків між станом рослинності та інформацією супутникових спостережень.

### Список літератури

1. Антоненко В.С. Метеорологический мониторинг посевов сельскохозяйственных культур в Украине с применением аэрокосмических методов. – Киев: АртЭК, 2002. – 308 с.
2. Гребень А.С., Красовская И.Г. Анализ основных методик прогнозирования урожайности с помощью данных космического мониторинга, применительно к зерновым культурам степной зоны Украины // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2012. - № 2 (54). – С. 170-180.
3. Kogan F.N. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar orbiting satellite data // Bull. Amer. Met. Soc. – 1995. - Vol. 76, No. 5. - P. 655-668.
4. Клещенко А.Д., Найдина Т.А. Динамическая модель продукционного процесса кукурузы с использованием спутниковой информации и методы прогноза урожайности // Метеорология и гидрология. – 2012. - № 12. - С. 88-98.
5. Dąbrowska-Zielińska K., F. Kogan, Ciołkosz A., Gruszczynska M., Kowalik W. Modelling of crop growth conditions and crop yield in Poland using AVHRR-based indices // Int. J. Remote Sensing. – 2002. - Vol. 23, No. 6. – P. 1109–1123.
6. Dąbrowska-Zielińska K., Ciołkosz A., Malińska A., Bartold M. Monitoring of agricultural drought in Poland using data derived from environmental satellite images // Geoinformation Issues. - 2011. - Vol. 3, No 1 (3). – P. 87–97.
7. Kogan F., Adamenko T., Kulbida M. Satellite-Based Crop Production Monitoring in Ukraine and Regional Food Security // Use of Satellite and In-Situ Data to Improve Sustainability. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. - Springer Science+Business Media B.V, 2011. - P. 99-104.
8. Колотий А.В. Регрессионные модели прогнозирования урожайности озимой пшеницы в Украине // Индуктивне моделювання складних систем. – 2012. - Вип. 4. – С. 92-101.
9. Коган Ф., Куссуль Н.Н., Адаменко Т.И. та ін. Сравнительный анализ результатов регрессионных и биофизических моделей в задаче прогнозирования урожайности озимой пшеницы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10. - № 1. – С. 215-227.
10. Semenova I.G. Regional atmospheric blocking in the drought periods in Ukraine // Journal of Earth Science and Engineering. – V. 3 (5). - 2013. - P. 341-348.
11. Семенова І.Г. Використання вегетаційних індексів для моніторингу посух в Україні // Український гідрометеорологічний журнал. – 2014. - Вип. 14. – С. 43-52.
12. Singh R.P., Roy S., Kogan F. Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India // Int. J. Remote Sensing. – 2003. - Vol. 24, No. 22. – P. 4393-4402.
13. Gao B.C. NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. – 1996. – Vol. 58. – P. 257-266.
14. Delbart N., Kergoat L., Le Toan T., L'hermitte J., Picard G. Determination of phenological dates in boreal regions using normalized difference water index // Remote Sensing of Environment. – 2005. - Vol. 97 (1). - P. 26-38.
15. Полевой А.Н. Теория и расчет продуктивности сельскохозяйственных культур. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. - 175 с.

#### **Моделирование урожайности озимой пшеницы в степной зоне Украины с использованием вегетационных индексов Семенова И.Г.**

Рассмотрены особенности использования спутниковых вегетационных индексов – нормализованного вегетационного индекса NDVI и нормализованного водного индекса NDWI, в эмпирическом моделировании урожайности зерновых культур. Для областей степной зоны Украины построены линейные регрессионные модели урожайности озимой пшеницы, предикторами в которой являются параметры, образованные от базовых вегетационных индексов – индекс условий вегетации и предложенный индекс влажности растительности. Также в моделях использован региональный индекс блокирования атмосферы для учета циркуляционных условий в начале вегетации. Верификация моделей показала удовлетворительную точность прогнозирования с достаточно высокой заблаговременностью.

**Ключевые слова:** нормализованный вегетационный индекс, индекс блокирования, урожайность.

#### **Modeling of winter wheat yield in the steppe zone of Ukraine using vegetation indices**

**Semenova I.G.**

The features of the use of satellite vegetation indices as the normalized vegetation index NDVI and normalized water index NDWI, in the empirical modeling of grain yields were considered. For areas of the steppe zone of Ukraine were built the linear regression models for the winter wheat yield, that uses as predictors the parameters derived from the basic vegetation indices - vegetation conditions index and proposed wet vegetation index. Also used the regional blocking index, which considering the atmospheric circulation conditions at the beginning of the growing season. Verification of the models showed a satisfactory prediction accuracy with sufficiently high of the lead time.

**Keywords:** normalized difference vegetation index, blocking index, yield.